

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# AKUMULACE TEPLA V SOLÁRNÍCH TEPELNÝCH SOUSTAVÁCH

HEAT STORAGE IN SOLAR THERMAL SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ MOKRIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PAVEL CHARVÁT, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Lukáš Mokriš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách**

v anglickém jazyce:

### **Heat storage in solar thermal systems**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sluneční záření je nejvydatnějším obnovitelným zdrojem energie, který lze využívat různým způsobem. Solární tepelné soustavy využívají sluneční energii ve formě tepla. Protože sluneční záření v jedné lokalitě není k dispozici 24 hodin denně je ve většině případů nutné solární teplo akumulovat v době slunečního svitu s možností pozdějšího využití v době, kdy sluneční záření není k dispozici.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši a porovnání různých způsobů akumulace tepla u solárních tepelných soustav.

Seznam odborné literatury:

Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar engineering of thermal processes

Články v časopisech a sbornících konferencí zabývají se problematikou akumulace tepla u solárních tepelných soustav.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Charvát, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 1.11.2010

L.S.



---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu



---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan



## ABSTRAKT

V této bakalářské práci jsou popsány způsoby akumulace tepla v solárních tepelných soustavách. Sluneční energie se nám dostává ve formě slunečního záření, které můžeme zpracovat a ukládat ve formě citelného tepla pevných látek a kapalin, také jako skupenské teplo tání některých látek nebo jako reakční teplo, které se uvolňuje během vratných chemických reakcí.

## KLÍČOVÁ SLOVA

teplo, akumulace, zásobník tepla, energie, sluneční záření

## ABSTRACT

In this bachelor's thesis are described methods of heat storage in solar thermal systems. Solar energy is retrieved in form of solar radiation, that is processed and stored in the form of sensible heat of solid materials and liquids, as heat of fusion of some material or as chemical heat, which is created during reversible chemical reactions.

## KEYWORDS

heat, accumulation, heat accumulator , energy, solar radiation



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MOKRIŠ, L. Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Charvát, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Charváta, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2011

.....

Lukáš Mokriš



## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Charvátovi, Ph.D. za jeho připomínky a cenné rady při vypracovávání této práce.



## OBSAH

Úvod .....	9
1 Sluneční energie .....	10
1.1 Využití sluneční energie .....	10
1.2 Sluneční záření .....	10
2 Solární tepelné systémy .....	13
2.1 Využití solárních tepelných systémů .....	13
2.2 Rozdělení solárních tepelných systémů .....	13
2.3 Základní části solárního tepelného systému .....	13
2.3.1 Kolektor .....	13
2.3.2 Absorbér .....	15
2.3.3 Tepelný zásobník .....	16
3 Zásobníky tepla .....	17
3.1 Principy akumulace tepla .....	17
3.2 Akumulace s využitím citelného tepla .....	18
3.2.1 Vodní zásobníky tepla .....	19
3.2.2 Konstrukční řešení vodního zásobníku .....	19
3.2.3 Štěrkové zásobníky .....	22
3.3 Dlouhodobá (sezónní) akumulace .....	23
3.3.1 Sezónní vodní zásobník .....	23
3.3.2 Sezónní zásobník voda-štěrk .....	24
3.3.3 Zásobník s využitím zemních vrtů .....	25
3.3.4 Zásobník zvodeň-voda (aquifer) .....	26
3.4 Akumulace s využitím latentního tepla .....	27
3.4.1 Látky se změnou skupenství (PCM) .....	29
3.4.2 Problémy s PCM materiály .....	31
3.4.3 Srovnání PCM materiálů s klasickými materiály .....	31
3.4.4 Solární elektrárna Andasol 1 .....	32
3.5 Akumulace s využitím sorpčního tepla .....	33
3.5.1 Akumulace využívající adsorpci vodní páry .....	33
3.5.2 Adsorpce při otevřeném cyklu .....	33
3.5.3 Adsorpce při uzavřeném cyklu s tuhým sorbentem .....	34
3.6 Akumulace s využitím reakčního tepla .....	34
Závěr .....	36
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	39





## ÚVOD

I když je sluneční záření vydatným obnovitelným zdrojem energie, tak se nám v této podobě na povrchu Země nedostává 24 hodin denně. Přímé záření ze Slunce je pro nás k dispozici ve slunečné dny přibližně jen 8 hodin. Při nepříznivém počasí se nám slunečního záření nemusí dostat vůbec. Proto potřebujeme sluneční energii uchovat (akumulovat) na doby, kdy je slunečního záření nedostatek, nebo kdy není k dispozici vůbec. Sluneční záření jako takové dosud akumulovat neumíme. Můžeme ji ovšem akumulovat již několika různými principy ve formě tepla.

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši způsobů akumulace tepla v solárních tepelných soustavách.



# 1 SLUNEČNÍ ENERGIE

Solární energie patří do skupiny takzvaných obnovitelných zdrojů, zjednodušeně to znamená, že bude k dispozici neustále.

Její mnohostranné využití má minimální dopad na životní prostředí. Výhodou je téměř neomezená dostupnost a pochopitelně i to, že je k dispozici zadarmo.

Zdrojem energie Slunce je termonukleární reakce, která probíhá v jeho jádru při teplotě  $1,5 \cdot 10^7$  K. Při této reakci se v podstatě atomy vodíku mění na atomy hélia a při tom se uvolňuje velké množství energie, které je předáváno jako elektromagnetické záření do kosmického prostoru. Na Zemi ovšem dozáří jen zlomek této energie.

„Při měření slunečního záření mimo naši atmosféru přibližně ve výšce satelitů, je naměřen proud energie přibližně  $1360 \text{ W/m}^2$ , což je tzv. **solární konstanta**.“ Ve skutečnosti ovšem konstantní není, neboť oběžná dráha Země kolem Slunce je eliptická, a to způsobuje její kolísání ve velikosti přibližně 3 %.

## 1.1 VYUŽITÍ SLUNEČNÍ ENERGIE

Využití sluneční energie rozdělujeme na přímé a nepřímé:

### Přímé využití

Slunečními paprsky dopadne na povrch Země přibližně  $1 \text{ kW/m}^2$  (solární konstanta). Tuto energii lze využít přímo na:

- **zpracování užitkové vody (ohřev UV),**
- **vytápění,**
- pro výrobu elektrické energie (fotovoltaický článek, Stirlingův motor),
- v zemědělství (skleník-skleníkový efekt).

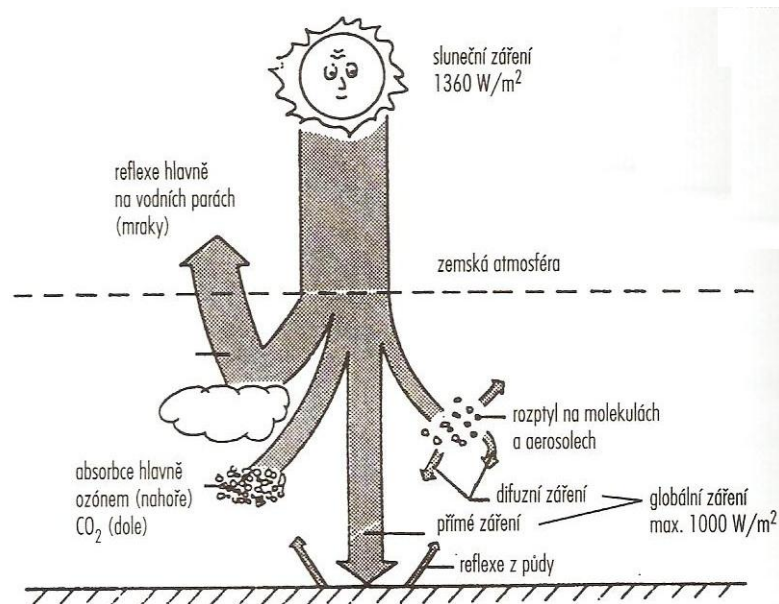
### Nepřímé využití

Nepřímo se sluneční energie v přírodě přeměňuje na:

- potenciální energii vody (vodní elektrárny),
- kinetickou energii vzdušných mas (vítr),
- chemickou energii biomasy.

## 1.2 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ

U záření průchodem zemskou atmosférou probíhá několik komplexních dějů, které způsobí, že části záření jsou absorbovány, reflektovány a rozptylovány.

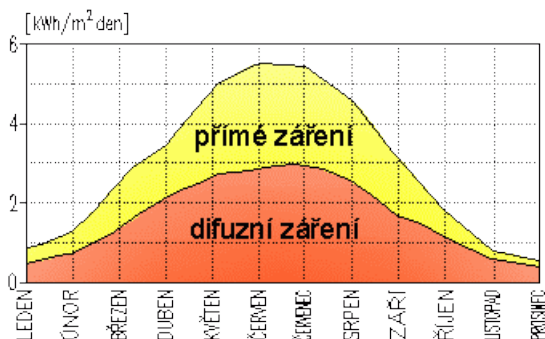


Obrázek 1 Ztráty solárního záření při průchodech atmosférou [1]

„Těmito ději se v průběhu života Země ustálila na zemském povrchu tepelná rovnováha, která je nutnou podmínkou života na Zemi. V našem ekosystému je sluneční záření nedílnou složkou pro téměř všechny energeticky podmíněné děje. Jedná se například o:

- pohyb vzduchu na základě rozdílných teplot a tlaků (větrná energie),
- pohyby moří (vlny a mořské proudy),
- oteplování povrchu Země a atmosféry,
- růst vegetace (fotosyntéza, biomasa).“

Při jasné obloze bez mraků dopadá největší část záření na Zemi, aniž by se měnil jeho směr. Toto záření je označováno jako **přímé** a lze jej soustřeďovat (koncentrovat). V atmosféře a v mracích dochází rozptylem tohoto přímého záření k **difuznímu záření** (světlo oblohy), které na Zemi dopadá ze všech směrů. Toto difuzní záření již koncentrovat nelze, ale jej částečně zpracovat. Součet těchto dvou záření se označuje jako záření **globální**.



Obrázek 2 Podíl přímého a difuzního záření v průběhu roku [19]



Tab. 1 Specifické výkony zářivé energie a podíl difuzního záření při různých povětrnostních podmínkách [19]

	<b>Záření [<math>\text{W/m}^2</math>]</b>	<b>Difuzní podíl [%]</b>
Modré nebe	800-1000	10
Zamlžené nebe	600-900	až 50
Mlhavý podzimní den	100-300	100
Zamračený zimní den	50	100
Celoroční průměr	600	50-60

Čím je vyšší podíl difuzního záření, tím více ubývá energie z globálního záření.

„Intenzita záření v poledne je:

- za zamračených dnů  $40\text{-}200 \text{ W/m}^2$ ,
- za jasných dnů  $600\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ .“

„Vlivem otáčení Země kolem své osy a jejího otáčení kolem Slunce během roku se mění záření na povrch Země, dále změnou ročních období a také střídáním dne a noci (obr. 3, tab. 3). V zimním období dopadá na severní polokouli méně energie než v období letním, protože dny jsou kratší a Slunce je na nebi níže než v létě. Pokles solárního záření, který je také způsoben globálním větrným systémem, u nás vedou k převážně chladnému zimnímu počasí s nízkými hodnotami solárního záření (tab. 2 a 3).“

Toto kolísající množství solárního záření je problém v technickém využití solární energie. Aby byly solární tepelné systémy schopny energii dodávat průběžně, musí zahrnovat odpovídající **tepelné zásobníky**.



## 2 SOLÁRNÍ TEPELNÉ SYSTÉMY

### 2.1 VYUŽITÍ SOLÁRNÍCH TEPELNÝCH SYSTÉMŮ

Solární tepelné systémy mohou být uplatněny v následujících oblastech:

- „ohřev bazénové vody;
- ohřev užitkové vody v letním a přechodném období, resp. předehřívání v zimě;
- vytápění, nejvíce vodou, řidčeji vzduchem (v přechodném období a v zimě);
- temperování výrobních a skladových hal vzduchovými kolektory;
- výroba procesního tepla pro průmyslové využití;
- (solární) vaření;
- (solární) sušení, např. potravin nebo sena;
- destilace (např. odsolování mořské vody a příprava teplé vody).“

### 2.2 ROZDĚLENÍ SOLÁRNÍCH TEPELNÝCH SYSTÉMŮ

Solární tepelné systémy rozlišujeme a dělíme dle různých hledisek:

- a) podle toho, k čemu využíváme získanou energii:
  - systémy pro ohřev teplé vody,
  - systémy pro ohřev bazénu,
  - systémy pro vytápění,
  - systémy pro chlazení a klimatizaci;
- b) podle toho, jakým způsobem je teplo přenášeno:
  - **systémy pasivní**- teplo je zde přenášeno pasivně, čili nepoužíváme žádné technické zařízení, využíváme pouze přirozenou konvekci (proudění). Výhodou je jednoduchost a spolehlivost, nevýhodou je nízká flexibilita (umístění zásobníku nad kolektory),
  - **systémy aktivní**- „jde o získávání solární energie technickými prostředky“. K přenosu tepla (cirkulaci teplonosného média) se využívá čerpadla nebo ventilátoru, které jsou ovládány nějakým regulačním zařízením. Výhodou je vyšší flexibilita systému a lépe se reguluje,
- c) podle použitého média, které slouží k přenosu tepla:
  - **systémy využívající k přenosu tepla vodu**- jejich výhoda spočívá v tom, že se dobře integrují do již existujících systému pro vytápění a pro ohřev vody. Další výhodou je, že voda má velkou tepelnou kapacitu (měrné teplo), a proto stačí malé průměry rozvodů,
  - **systémy využívající vzduch**- výhodou je jednodušší konstrukce kolektoru, nevýhodou je, že se u nich musí používat rozvodná potrubí o velkém průměru, jelikož má vzduch malou tepelnou kapacitu, a také jsou zapotřebí větší objemy zásobníků (používá se např. štěrk či oblázky, kamenivo).

### 2.3 ZÁKLADNÍ ČÁSTI SOLÁRNÍHO TEPELNÉHO SYSTÉMU

#### 2.3.1 KOLEKTOR

„Solární kolektor je ve své podstatě zdokonalený absorbér, umožňující celoroční provoz. Jeho velmi dobrá tepelná izolace přispívá ke zlepšení funkce a účinnosti kolektoru.

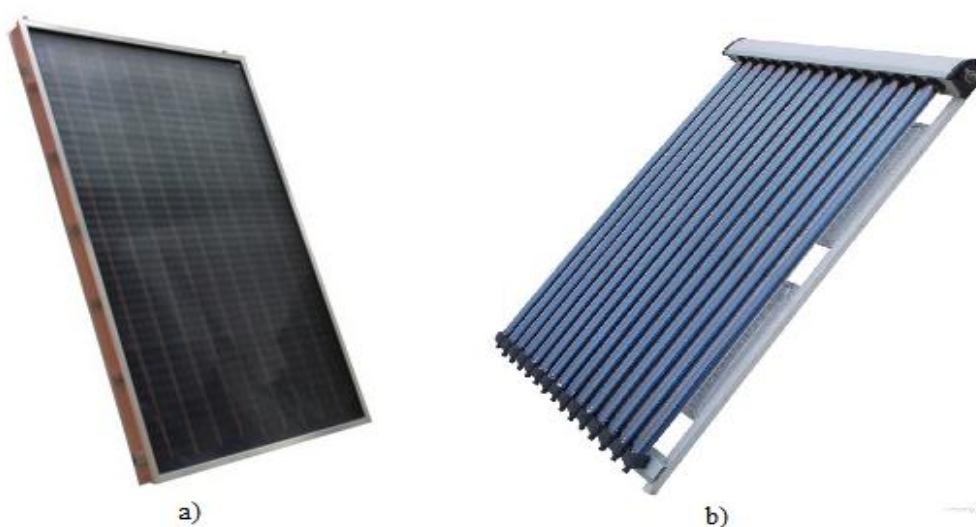
Na vrchní straně je transparentní kryt vyrobený nejčastěji ze skla nebo polykarbonátu, který propustí krátkovlnné sluneční záření, ale zabrání zpětnému vyzařování dlouhovlnného záření



(skleníkový efekt). Na spodní straně a po bocích je absorber izolován klasickými izolačními materiály např. minerálními vlákny, pěnovým polyuretanem apod. (omezení ztrát vedením tepla a vyzařováním). Celý systém je uložen v tuhém rámu (omezení ztrát konvekci), chráníci absorber proti mechanickým vlivům a vlhkosti. Teplo je odváděno z kolektoru pomocí teplonosného média (voda, nemrznoucí směs, vzduch) potrubím, které musí být izolované až do místa potřeby, např. do solárního zásobníku.“

Podle pracovního média se dělí kolektory na **kapalinové** a **vzduchové**, respektive **kombinované**.

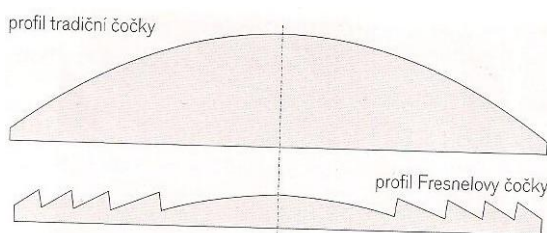
Dále kolektory dělíme podle tvaru na **ploché** a **trubicové** (absorbér je zataven ve vakuové trubici). Vakuum pomáhá snižovat tepelné ztráty a zvyšuje účinnost kolektoru.



Obrázek 3 Typy kolektorů a) plochý, b) trubicový [17],[18]

Některé solární kolektory mohou mít absorber opatřený „**spektrálně selektivní vrstvou** (speciální černá barva, galvanické pokovení)“, díky tomu mají vyšší účinnost a dokážou zpracovat i difúzní záření, a také se snižují tepelné ztráty radiací. Zasklení je ze speciálního skla, které má nízkou pohltivost slunečního záření a má zvýšenou mechanickou pevnost.

**Koncentrační kolektory**, které využívají lineární Fresnelovy čočky, koncentrují záření na menší absorpční plochu. Tímto se dá dosáhnout vyšších teplot a vyšší účinnosti. Obvykle je nutná přítomnost polohovacího zařízení, které natáčí kolektor za Sluncem.



Obrázek 4 Schéma Fresnelovy čočky [2]



Obrázek 5 Koncentrační kolektory [15]

### 2.3.2 ABSORBÉR

Absorbér (absorbovat = pohlcovat, přijímat záření) je nejčastěji plochá deska s neodrazivým (tmavým) povrchem. Jeho povrch má schopnost dopadající přímé i difuzní záření přeměnit na teplo, a při tom ho z něj vyzářit co nejméně zpět. K tomu buďto používá černý nátěr, který je daleko lepší než jiné světlejší barvy, nebo jsou k dispozici speciální povrstvení, která plní tento požadavek ještě lépe.





Obrázek 6 Funkce povrstvení absorbéru [1]

Na absorbéru jsou připevněny trubky, kterými protéká teplotnosné médium. Aby médium odvádělo dobře teplo, musí mít absorbér i trubky dobrou tepelnou vodivost. Vyrábí se proto z dobře tepelně vodivých materiálů, jako jsou hliník nebo měď, které se k trubkám (nejčastěji měděným) sletují, svaří nebo se do sebe zalisují.

Absorbér, který je ohřátý naneštěstí část svého tepla ztrácí.

- Ztráty **vyzařováním** (radiací) tepla: absorbér, který je teplejší než jeho okolí, vyzařuje teplo „dlouhovlnným infrazářením“ do okolí.
- Ztráty **konvekci** (prouděním): na teplém absorbéru se ohřívá vzduch, který stoupá vzhůru a odnáší tím i teplo.
- Ztráty **vedením** (kondukcí) tepla: část tepla je odváděna také vedením teplotnosné látky přes přívodní potrubí a zadní stěnou absorbéru.

### 2.3.3 TEPELNÝ ZÁSOBNÍK

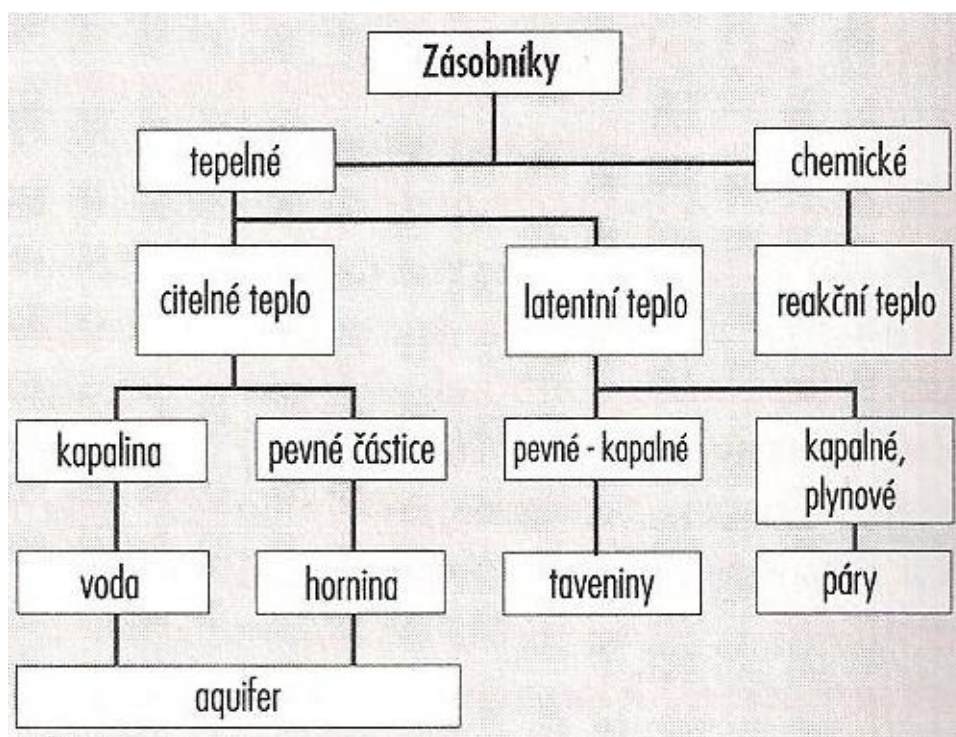
Jelikož se nabídka energie většinou nekryje s její momentální poptávkou, musí se do solárního systému zahrnout tepelný zásobník, který bude vyrovnávat kolísání dodávek solární energie. Energie, která je přebytečná z kolektoru převezme a uchová ji na období kdy je její nedostatek. Existuje řada konstrukcí, které se liší například podle „fyzikálních vlastností (beztlaký, tlakový, zásobník latentního tepla atd.), podle druhu použitého média (vodní, šterkový, vzduchový.), konstrukčního materiálu (ocelový, plastový), účelu použití (zásobník pitné vody, vyrovnávací zásobník apod.).“ Materiály použité na zásobník musí mít dobrou tepelnou odolnost a životnost nejméně 20 let.



### 3 ZÁSObNÍKY TEPLA

Protože ne vždy se nabídka energie kryje s její momentální potřebou, musíme v solárních systémech používat zásobníky tepla. „Zásobníky hrají v solární technice velmi důležitou roli, proto se o nich někdy říká, že jsou srdcem solární soustavy. Z praxe vyplývá poznatek, že pokud bude solární soustava s vysoce výkonným kolektorem navržena v kombinaci s nevhodně navrženým zásobníkem, nebude účinnost soustavy tak vysoká, jak by ve skutečnosti mohla být.“

#### 3.1 PRINCIPY AKUMULACE TEPLA



Obrázek 7 Rozdělení zásobníků [1]

Podle typu akumulací látky a využití podle fyzikálních vlastností a principu lze akumulaci dělit na:

- **akumulaci s využitím citelného tepla**- dochází k ohřátí kapaliny nebo pevné látky bez změny skupenství- využití tzv. citelného tepla. Využívá se tepelné kapacity látek v daném rozsahu teplot, akumulovaná energie je přímo závislá na počáteční a konečné teplotě, nejlepší a nejvíce používanou látkou je voda, která má velké měrné teplo. Hustota akumulace u tohoto typu 100-300 MJ/m<sup>3</sup>;
- **akumulaci s využitím skupenského tepla**- „zde se využívá takzvaného latentního tepla, (tj. skupenského tepla tání/tuhnutí) a tepelné kapacity látky (v pevném a tuhém stavu.)“ Dostupné používané látky jsou například parafín, vosk nebo solné hydráty jako Glauberova sůl. Hustota akumulace 150-500 MJ/m<sup>3</sup>;



- **akumulaci s využitím sorpčního tepla**- u tohoto způsobu se využívá akumulace vodní páry v tuhé (adsorpce) nebo kapalné (absorpce) látce, využívá se uvolňovaného tepla při sorpci. Hustota akumulace mezi 500-1000 MJ/m<sup>3</sup>;
- **akumulaci s využitím chemických reakcí**- „tento princip využívá vratné chemické reakce, které jsou doprovázené jímáním/uvolňováním tepla.“ Hustota akumulace 1000–3000 MJ/m<sup>3</sup>.

Podle časových parametrů akumulace se zásobníky dělí:

- **krátkodobé zásobníky**- denní či vícedenní zásobníky, používají se především pro přípravu teplé vody (TV), u které je denní potřeba v průběhu roku přibližně konstantní;
- **dlouhodobé zásobníky**- jsou takové, které uchovávají získanou energii pro využití v jiném ročním období (sezónní zásobníky tepla).

### 3.2 AKUMULACE S VYUŽITÍM CITELNÉHO TEPLA

„Tento typ, akumulace s využitím citelného tepla využívá tepelné kapacity akumulací látky. Jímání (uvolňování) tepla je doprovázeno změnou teploty pracovní látky (ohřevem nebo ochlazením).“ Matematicky lze tuto akumulaci popsat následující rovnicí:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot \rho \cdot c \cdot dt = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \quad (1)$$

kde  $V$  [m<sup>3</sup>] je objem pracovní látky,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota pracovní látky,  $c$  [J/kg.K] je měrná tepelná kapacita pracovní látky a  $t_{1,2}$  [°C] jsou teploty na počátku a na konci uvolňování tepla  $Q$  [J] je teplo.

Vhodnou pracovní látkou je látka s velkou tepelnou kapacitou, která je zároveň levná. Těmto podmínkám nejlépe odpovídá voda. Používají se také pevné látky, např. šterk často i kombinace šterku s vodou, pro zvýšení hustoty akumulace. Největší výhodou pevných látek je rozsah provozních teplot, který je větší než u vody, ale také jednodušší konstrukce zásobníku. U zásobníků s pevnými látkami také nehrozí poškození mrazem, což u zásobníků s vodou je problém.



Tab. 2 Objemová tepelná kapacita materiálů pro akumulaci tepla při 20 °C [1]

Médium	Rozsah teplot [°C]	Specifická tepelná kapacita [Wh/kg.K]	Objemová tepelná kapacita [Wh/m <sup>3</sup> .K]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
voda	0-100	1,16	1160	998
vzduch	-50–1000	0,28	0,31	1,1
olej	0-400	0,44-0,5	350-450	800-900
šterk, písek	0-800	0,2	360-390	1800-2000
granit	0-800	0,21	570	2750
beton	0-500	0,24	460-560	1900-2300
cihla	0-1000	0,23	330-440	1400-1900
železo	0-800	0,13	1000	7860
šterkovodní zásyp (37% vody)	0-100	0,37	810	2200
směs solí (53 KNO <sub>3</sub> + 4 NaNO <sub>2</sub> + 7 NaNO <sub>3</sub> )	150-450	0,36	480-550	2561-2243

Nevýhodou tohoto způsobu je nízká hustota akumulace, která musí být kompenzována velkými objemy akumulčních zásobníků.

### 3.2.1 VODNÍ ZÁSOBNÍKY TEPLA

„Vodní zásobníky patří mezi nejběžnější a nejpoužívanější zásobníky tepla v solární technice.“

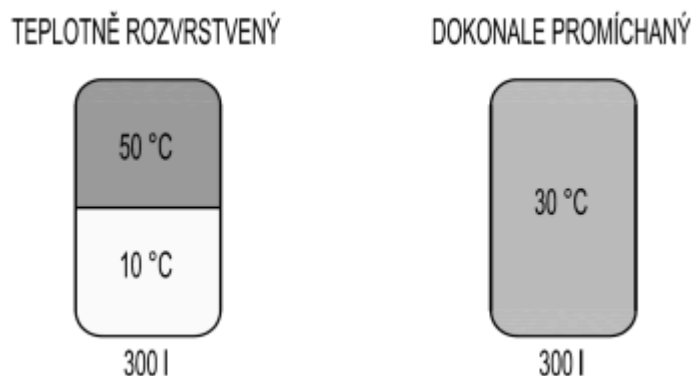
Voda má ve srovnání s jinými látkami velké množství výhod: je dostupná, levná, nehořlavá, nejedovatá, má výborné přenosové vlastnosti (vodivost) a vysokou tepelnou kapacitu.

Nevýhodou je omezený pracovní teplotní rozsah, při 0°C tuhne, čímž mění svůj objem a při 100°C se vypařuje a při tom také mění svůj objem, a to výrazně, dále má malé povrchové napětí („úniky netěsnostmi“) a je korozivní

### 3.2.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VODNÍHO ZÁSOBNÍKU

#### Rozvrstvení tepla (stratifikace)

Uvažujme například dva zásobníky teplé vody o objemu 300 litrů. Uživatel obvykle vyžaduje teplou vodu v rozmezí teplot mezi 45 a 55 °C, přičemž teplota přiváděné studené vody je nejčastěji 10 °C. U prvního zásobníku je horní část (150 litrů) nabitá na 50 °C a dolní část zůstává na teplotě 10 °C. Druhý zásobník je celý nabit na 30 °C je tedy zcela promíchán. Zásobník s objemem 150 l vody o teplotě 50°C a 150 l vody o teplotě 10°C má stejný obsah energie jako zásobník s 300 l vody o teplotě 30°C. U prvního zásobníku je uživatel spokojen, ve druhém případě musí vodu dohřívát cizím zdrojem tepla.



Obrázek 8 Rozdíl mezi stratifikovaným a promíchaným zásobníkem [11]

Jedna soustava funguje správně, druhá špatně i přes to že mají ostatní prvky stejné. Rozdílem v tomto případě je tepelné vrstvení objemu zásobníku podle teploty. Chladnější voda je těžší a klesá dolů, teplejší voda stoupá vzhůru. Aby zásobník dobře fungoval je nutné nejen vrstvení podle teploty vytvořit, ale také ho udržet. Z uvedeného příkladu je zřejmé, že u solárních zásobníků lze dosáhnout správnou konstrukcí teplotního rozvrstvení, a tím i dobrého výnosu celé soustavy.

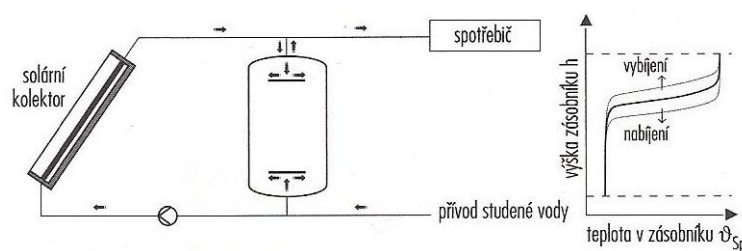
„Faktory ovlivňující tepelné promíchávání objemu zásobníku:

1. přívod teplé vody;
2. poměr výška/šířka, (štíhlost zásobníku);
3. tepelné ztráty zásobníku;
4. odběr teplé vody, přívod studené vody;
5. vertikální vedení tepla ve stěně zásobníku;
6. vedení pracovní látkou zásobníku (tepelná difuze), nízká tepelná vodivost vody (0,6 W/m.K).“

### Zapojení přívodu a odběru pracovní látky

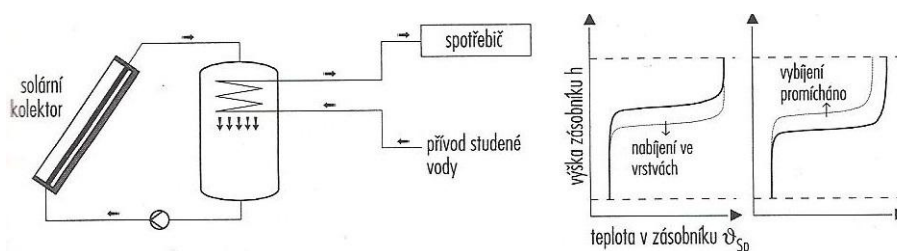
Největší vliv na tepelné rozvrstvení vody v zásobníku má způsob jeho nabíjení a vybíjení (přisun a odběr tepla), které mohou probíhat buďto nepřímo prostřednictvím tepelného výměníku nebo přímo (přitékající a odtékající vodou).

Nejjednodušším případem je **zásobník s přímým nabíjením a vybíjením**. Teplo jako horká voda se do zásobníku přivádí shora a studená voda se odvádí spodní částí zásobníku. Horká voda proudí shora dolů (pístový efekt). Proces vybíjení je přesně opačný. Oba procesy, jak nabíjení, tak i vybíjení se zde dějí po vrstvách (nedochází k promíchávání zásobníku). Aby bylo zachováno dobré rozvrstvení zásobníku, musí voda proudit vodorovným směrem, toho je docíleno konstrukčními úpravami jako například plechovými zarážkami proudění. Do kolektoru je neustále přiváděna studená voda, dokud se zásobník zcela nevybije. Nevýhodou přímého nabíjení je, že kolektor a zásobník nejsou odděleny, což má za následek nemožnost použití nemrznoucího prostředku v solárním okruhu (systém musí být v zimě vyprázdněn), a proto se používá jen v klimatických podmínkách, kde nehrozí nebezpečí mrazu, ve střední Evropě se téměř nepoužívají.



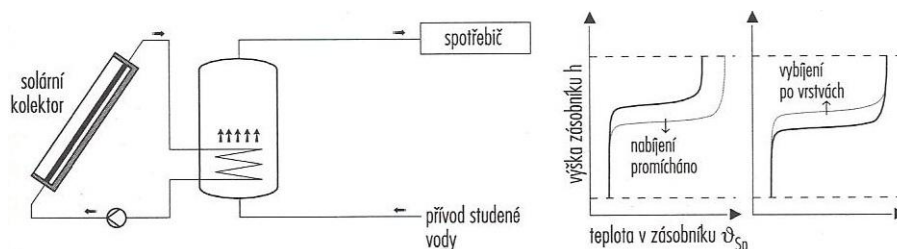
Obrázek 9 Tepelný zásobník s přímým nabíjením a vybíjením [1]

**Zásobník s přímým nabíjením a nepřímým vybíjením.** Přívod tepla se děje následovně: do horní části zásobníku se přivádí horká voda a ze spodní části se odebírá voda studená, jak tomu bylo u předcházejícího způsobu. Nabíjení je realizováno bez promíchání zásobníku. Odběr tepla se děje pomocí tepelného výměníku ve vrchní, horké části zásobníku. Při vybíjení dochází vlivem ochlazení ke konvekci, mířící dolů, což má za následek promíchání objemu zásobníku. Tento způsob lze realizovat u kombinovaných solárních soustav, tj. jak pro přípravu TV v tepelném výměníku, tak pro vytápění.



Obrázek 10 Tepelný zásobník s přímým nabíjením a nepřímým vybíjením [1]

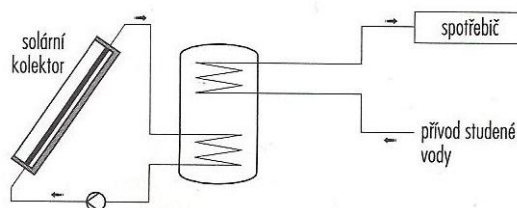
Převážně nejpoužívanější způsob pro přípravu TV je **zásobník s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením**. Zde je okruh spotřebiče oddělen od solárního okruhu, tzn., že jako pracovní látka může být použita nemrznoucí směs, což nám umožňuje celoroční provoz i v zimním období při nebezpečí mrazu. Proces nabíjení je realizován pomocí vnitřního tepelného výměníku, který je zde umístěn ve spodní, chladnější části zásobníku. Při nabíjení zásobníku vzniká na tepelném výměníku konvekční proudění směřující vzhůru, čímž se nám objem zásobníku promíchá. Naopak při vybíjení se teplá voda odebírá z horní části zásobníku a studená se přivádí do části spodní (vybíjí se po vrstvách).



Obrázek 11 Tepelný zásobník s nepřímým nabíjením a přímým vybíjením [1]

U **zásobníků s nepřímým nabíjením a vybíjením** je jak přívod, tak odběr tepla realizován jednotlivými tepelnými výměníky. U tohoto způsobu dochází k promíchávání objemu

zásobníku u nabíjení i vybíjení, z hlediska vrstvení tepla je tento způsob málo účinný. Toto uspořádání je vhodné pro soustavy s podporou vytápění (jednoduché kombinované soustavy).



Obrázek 12 Tepelný zásobník s nepřímým nabíjením a vybíjením [1]

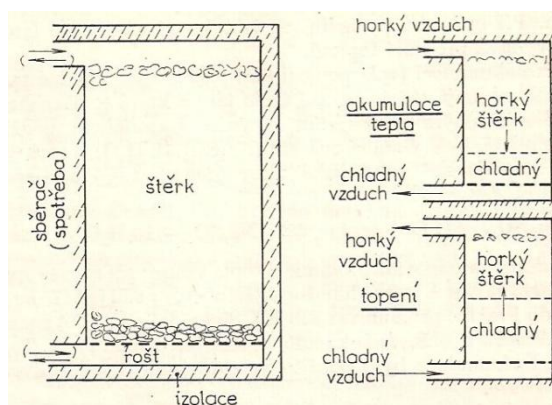
### 3.2.3 ŠTĚRKOVÉ ZÁSOBNÍKY

Štěrkové zásobníky se používají zejména pro vícedenní či sezónní akumulaci. Štěrk je z hlediska ceny levný, dostupný akumulační materiál a používá se hlavně pro akumulaci tepla ze vzduchových kolektorů. Teplonosnou látkou je tudíž horký vzduch, který je ohříván v kolektorech. Jako štěrkový zásobník tepla se používá izolovaná nádrž (nejčastěji betonová) vyplněná štěrkem nebo oblázky.

Z kolektoru do štěrku je přiváděn horký vzduch, který proudí mezi kameny a odevzdává jim své teplo. Přenos tohoto tepla bude tím lepší, čím větší bude tzv. styčná plocha (celkový povrch částic), která připadá na 1 kg štěrku. Například: krychle bazaltu (čedič), která má délku hrany 1 m a hmotnost 2917 kg, má povrch pouze 6 m<sup>2</sup>. Pro akumulaci tepla vhodná je, ale pro příjem tepla z horkého vzduchu, kvůli své malé styčné ploše vhodná není. Avšak po rozdrvení této krychle na tisíce krychliček o objemu 1 cm<sup>3</sup> a následném neuspořádaném naházení do zásobníku, bude mít jejich povrch velikost 600 m<sup>2</sup> (styčná plocha se stokrát zvětší), což už je pro přenos tepla příznivé. Kvůli tomuto se používá v zásobnících štěrk o velikosti částic 1 až 5 cm. Částice štěrku by měly mít přibližně stejnou velikost, aby mezi nimi byl dostatek volného prostoru pro průchod vzduchu. Tím se zajistí minimální pokles tlaku. Pro odvod tepla ze zásobníku se okruh s kolektorem uzavře a vzduch začne proudit opačným směrem do okruhu spotřebiče.

Srovnání akumulace tepla vodního a štěrkového zásobníku ukazuje, že pro nízké teploty je voda daleko výhodnější, protože stejné množství tepla se akumuluje v třikrát menším objemu vody, a také je levnější. U štěrkových zásobníků se nepoužívají tepelné výměníky, nedochází ke konvekčnímu přenosu tepla a je zde také minimalizován přenos tepla kondukcí (částice štěrku se dotýkají pouze hranami).

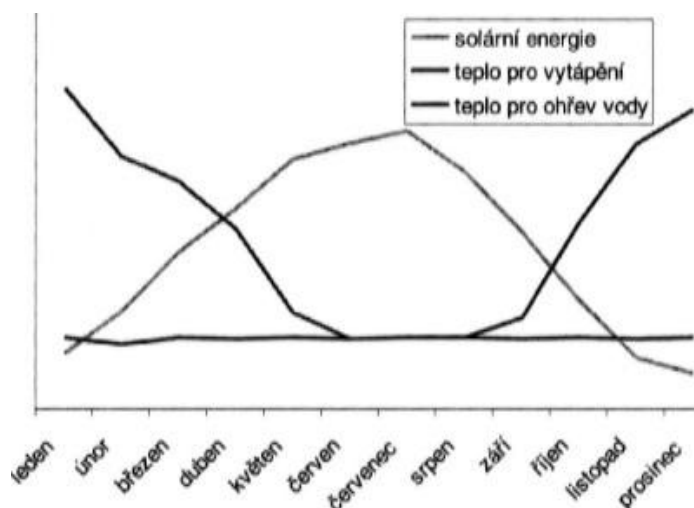




Obrázek 13 Štěrkový zásobník tepla. Vpravo nahoře proudění vzduchu při ukládání tepla, vpravo dole při čerpání tepla [5]

### 3.3 DLOUHODOBÁ (SEZÓNŇÍ) AKUMULACE

V důsledku nerovnoměrného dopadu slunečního záření na Zemi během celého roku způsobí, že v zimě, kdy je potřeba tepelné energie na vytápění největší, je energie, která je zachycena kolektory nedostatek (obr. 14). Díky tomuto důsledku solární soustava, která by měla dodávat teplo pro vytápění, vyžaduje dlouhodobé ukládání tepla ze solárních kolektorů. Tato akumulace se provádí pomocí speciálních sezónních zásobníků (zemní nebo nadzemní).

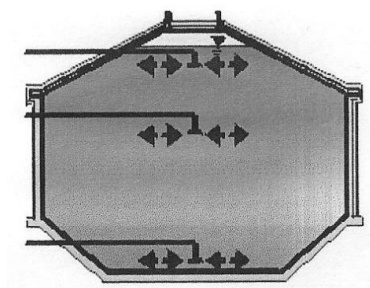


Obrázek 14 Spotřeba tepla a nabídka solární energie [16]

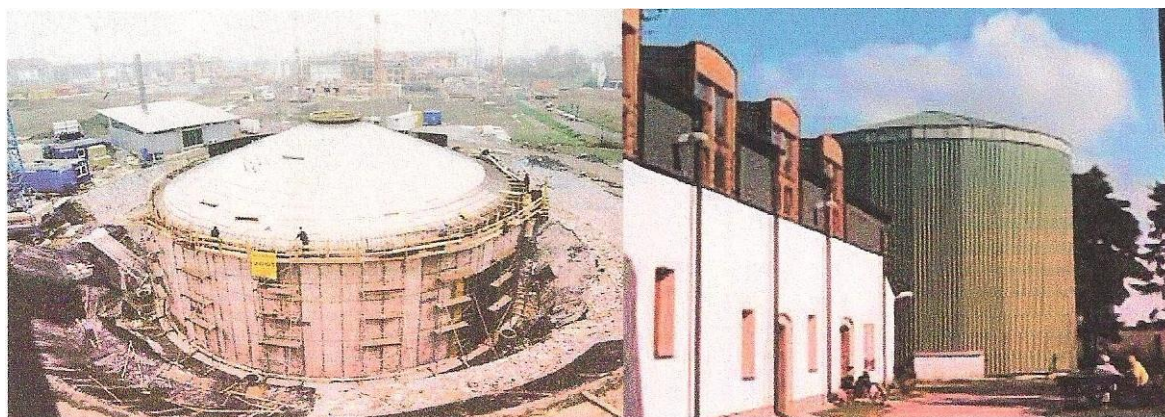
#### 3.3.1 SEZÓNŇÍ VODNÍ ZÁSObNÍK

Tento typ umožňuje používání v různých geologických podmínkách. Vyniká svou malou velikostí, ale poslouží ke skladování tepla jen v řádu dní, popřípadě týdnů. Nádrž, která bývá vyrobena ze železobetonu, se částečně zakope do země a opatří se izolací. Pracovní látkou je voda, takže teploty v zásobníku bývají zpravidla v rozmezí od 10 do 95°C. Objemy takto

konstruovaných zásobníků bývají běžně 50-6000 m<sup>3</sup>. Výhodou oproti ostatním typům sezónní akumulace je vysoká hustota akumulace.



Obrázek 15 Sezónní vodní zásobník [13]



Obrázek 16 Sezónní zásobníky- nalevo Friedrichshafen (12000 m<sup>3</sup>), napravo Slatiňany (1100 m<sup>3</sup>) [8]

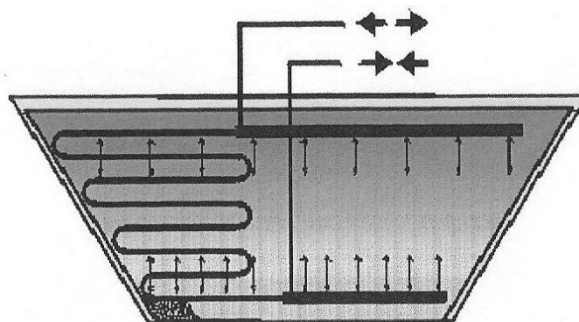
### 3.3.2 SEZÓNÍ ZÁSObNÍK VODA-ŠTĚRK

Jedná se o betonovou jámu, která může mít tvar kužele, pyramidy nebo kvádrů. Betonové stěny se obstarají vodotěsnou izolací, která je z umělohmotných izolačních pásků, což ovlivní maximální teplotu v zásobníku, která je nejvýše 80°C. Jako akumulační látka se používá směs štěrku a vody, popřípadě zeminy. Výhodou tohoto typu je, že se nevyžaduje nosná stropní konstrukce. Zásobník musí být tepelně izolován shora a z bočních stran, menší zásobníky bývají izolovány i ze spodu. Akumulace tepla a jeho využívání probíhá za pomoci rohoží z umělohmotných trubek. Podíl štěrku v nádrži bývá kolem 60-70 %. Díky jeho malé schopnosti akumulovat teplo, musí být kapacita nádrže až dvakrát větší, než v případě samostatného vodního zásobníku.





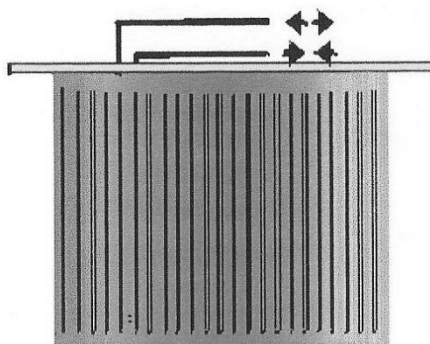
Obrázek 17 Stavba sezónního zásobníku štěrk-voda [8]



Obrázek 18 Sezónní zásobník voda-štěrk [13]

### 3.3.3 ZÁSOBNÍK S VYUŽITÍM ZEMNÍCH VRTŮ

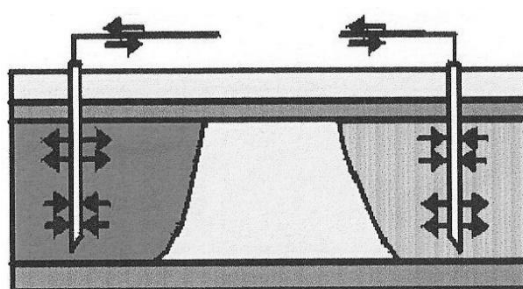
Jako akumulční látku u tohoto typu zásobníku nejčastěji používáme zeminu, popřípadě horninu (jíl a jílovité horniny). Pro ukládání tepla do a předávání tepla ze zásobníku se používají trubky ve tvaru U. Materiálem je nejčastěji umělá hmota a velikost trubek je 100-200 mm. Hloubka vrtu bývá běžně od 20 do 100 m. Doporučený odstup od sousedních vrtů je 1,5 až 3 m. Přenos tepla uvnitř zásobníku je závislý na tepelné vodivosti použitého média v zásobníku, což je dáno geologickými podmínkami. Výhodou tohoto typu jsou nízké investiční náklady a univerzálnost technologie. Nevýhodou je malá akumulční schopnost zeminy, která je vykompenzována 3-5 krát větší kapacitou zásobníku.



Obrázek 18 Sezónní akumulace do vrtů [13]

### 3.3.4 ZÁSOBNÍK ZVODEŇ-VODA (AQUIFER)

Pro sezónní akumulaci lze také dobře využít propustná podloží. U tohoto typu jsou využívány dvě přirozeně vytvořené, oddělené vrstvy spodních vod, kdy jedna funguje v létě jako akumulátor tepla a druhá slouží jako zdroj pro odběr studenější vody. V létě se vstupní část nabíjí, když se ohřeje, rozšiřuje se směrem k čerpací části. Během chladného období se obrátí směr proudění a propustné podloží se ochlazuje. Teplo dodávané z těchto spodních vod je schopné pokrýt potřebu tepla pro ohřev UV a pro vytápění až z 50 %. Teplo je do/z nádrží akumulováno/odebíráno studnami, které zasahují do vrstev spodní vody minimálně 50 m a maximálně 300 m pod zemským povrchem. Jelikož není možná tepelná izolace za těchto podmínek, ohřívá se podzemní voda jen do nízkých teplot. K tomu také přispívá skutečnost, že tyto využívané vrstvy spodní vody slouží jako zdroj pitné vody a při vyšší teplotě jak 50°C by mohlo dojít ke změně kvality zdroje.



Obrázek 19 Propustné podloží pro sezónní akumulaci tepla [13]

Tab. 3 Příklady projektů s různými typy zásobníků [14]

Lokalita	Rostock	Hamburk	Neckarsulm	Chemnitz
velikost obytného komplexu	108 bytů	124 rodinných domů	6 bytových domů + škola, domov důchodců	kancelářská budova



rok zprovoznění	2000	1996	1998	2000
vytápěná obytná a užitná plocha	7000	14800	20000	4680
solární systém: -kolektorová plocha (m <sup>2</sup> )	1000	3000	2700	510
-typ zásobníku	zvedeň-voda	vodní zásobník	zemní vrty	štěrka-voda
-kapacita zásobníku (m <sup>3</sup> )	20000	4500	20000	8000
roční spotřeba tepla (MWh)	497	1610	1663	573
podíl solárního tepla na celkové spotřebě (%)	48	49	50	30
investiční náklady na solární systém (mil. Kč)	28	86	58	56
cena solárního tepla (Kč/kWh)	9,98	10,00	6,80	8,40

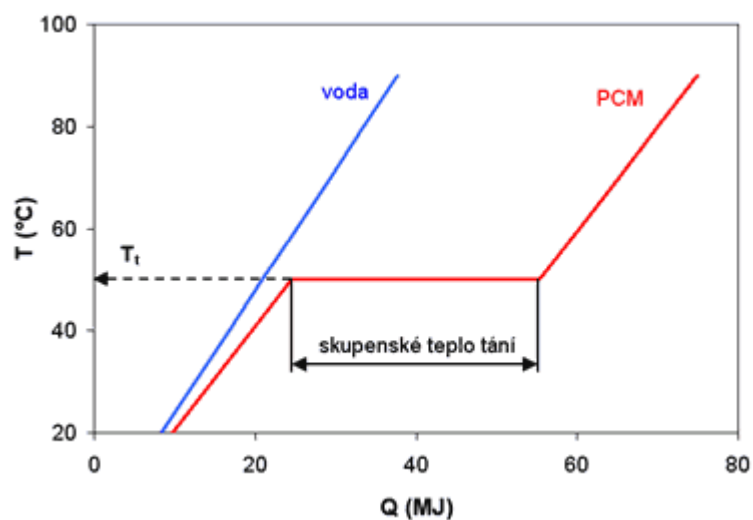
### 3.4 AKUMULACE S VYUŽITÍM LATENTNÍHO TEPLA

Existují materiály (látky), které nám umožňují v tepelném zásobníku uložit větší množství tepla, i při zachování stejných rozměrů zásobníku. U těchto látek se nevyužívá jen měrná tepelná kapacita, ale i změna skupenství dané látky. Při změně látky z kapalného do pevného stavu se uvolňuje energie ve formě tepla. Tato energie se označuje jako latentní, protože není vnímána jako energie citelná, tzn. nevede k žádné změně teploty. U přechodu látky z pevného skupenství do kapalného, musíme naopak toto množství energie dodat. Tyto náplně (látky) tepelných zásobníků se označují zkratkou PCM (Phase Change Material).

K akumulaci tepelné energie je využitelná jen změna fáze mezi látkou tuhou a kapalnou (tání-tuhnutí). Vzhledem k značné změně objemu akumulační látky při změně skupenství z kapaliny na plyn (vypařování, srážení) není tato změna vhodná pro akumulaci tepelné energie. Akumulaci tepla s využitím tání-tuhnutí látky lze popsat rovnicí:

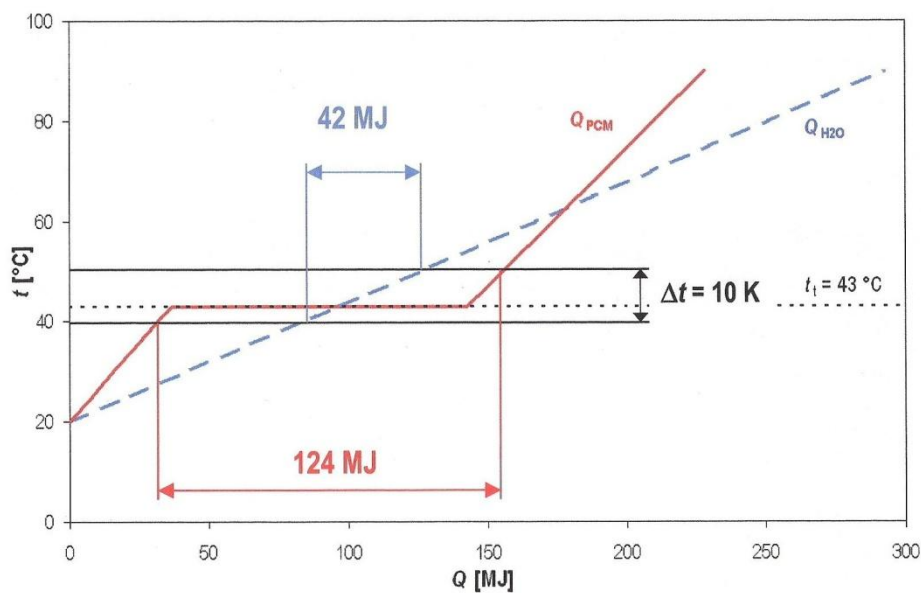
$$Q = \int_{t_1}^{t_t} V \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot dt + V \cdot \rho_t \cdot l_t + \int_{t_t}^{t_2} V \cdot \rho_k \cdot c_k \cdot dt = V \cdot [\rho_p \cdot c_p \cdot (t_t - t_1) + \rho_t \cdot l_t + \rho_k \cdot c_k \cdot (t_2 - t_t)],$$

kde  $V$  [m<sup>3</sup>] je objem pracovní látky,  $\rho_{p,k}$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota pracovní látky v pevném (kapalném) skupenství,  $c_{p,k}$  [J/kg.K] je měrná tepelná kapacita pracovní látky v pevném (kapalném) skupenství,  $l_t$  [J/kg] je skupenské teplo tání/tuhnutí,  $t_{1,2}$  [°C] jsou teploty na počátku a na konci jímání/uvolňování tepla  $Q$  [J] a  $t_t$  [°C] je teplota tání/tuhnutí. (2)



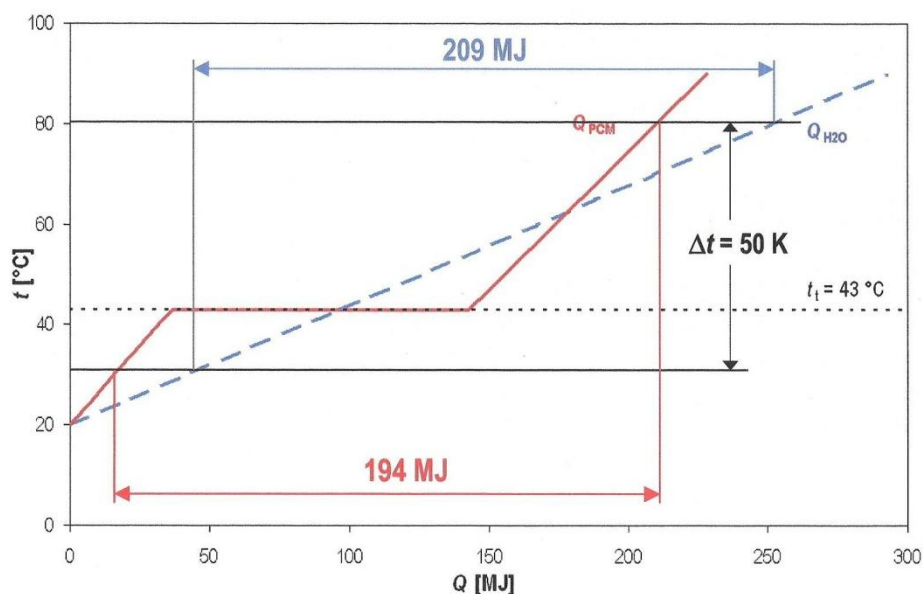
Obrázek 21 Porovnání akumulační kapacity zásobníku citelného tepla (vodní) a zásobníku tepla se změnou skupenství (PCM) [10]

Při stejném rozdílu teplot  $\Delta T$  může změna skupenství látek vzhledem k jímání a uvolňování latentního tepla poskytnout vyšší akumulační kapacitu oproti akumulaci citelného tepla.



Obrázek 20 Porovnání akumulační kapacity zásobníku citelného tepla (voda) a zásobníku změnou skupenství (PCM) při malém teplotním rozdílu [7]

Toto platí však pouze jen při malém pracovním teplotním rozdílu  $\Delta T$ , se zvyšujícím se rozdílem teplot tato výhoda klesá. Pro sezónní akumulaci jsou PCM nevhodné.



Obrázek 21 Porovnání akumulční kapacity zásobníku citelného tepla (voda) a zásobníku se změnou skupenství (PCM) při větším teplotním rozdílu [7]

Akumulaci lze optimalizovat vhodným výběrem PCM materiálů a způsobem použití (pouze vlastní materiál, kombinace s vodními zásobníky). Hlavní výhodou tohoto způsobu akumulace jsou menší tepelné ztráty a menší objem zásobníku, díky vyšší hustotě akumulace.

### 3.4.1 LÁTKY SE ZMĚNOU SKUPENSTVÍ (PCM)

Materiály, které jsou vhodné pro akumulaci se změnou skupenství, by měly mít následující vlastnosti:

- vysoké měrné skupenské teplo tání  $l_t$  [J/kg];
- velkou tepelnou vodivost  $\lambda$  [W/m.K];
- bod tání  $t_t$  [°C], měl by ležet ve vhodném rozsahu pro dané aplikace (u solární soustavy mezi 35-70°C);
- malé změny objemu při změně skupenství;
- odolnost vůči přechlazení;
- nízká cena;
- nehořlavost;
- netoxičnost;
- chemická stabilita.

Těmito vlastnostem odpovídají především látky na bázi parafinovaných vosků, mastných kyselin a hydratovaných solí a eutektika organických a anorganických látek.



Základní rozdělení PCM:

- anorganické látky;
- organické látky.

Anorganické látky:

-výhody:      - vysoké měrné skupenské teplo tání, ( $l_t \sim 236 \text{ kJ/kg}$ );  
                 - dobrá tepelná vodivost, ( $\lambda \sim 0,5 \text{ W/m.K}$ );  
                 - levné a nehořlavé;

-nevýhody:    - způsobují vznik koroze u většiny kovů;  
                 - možnost přechlazení;

-příklady anorganických PCM:

- Glauberova sůl ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ),  $t_t = 32,4^\circ\text{C}$ ,  $l_t = 254 \text{ kJ/kg}$ ;
- hexahydrát chloridu vápenatého ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ );
- dekahydrát síranu sodného ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ );
- dekahydrát uhličitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

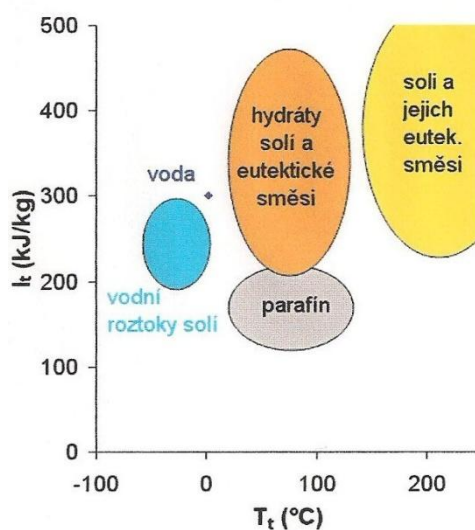
Organické látky:

-výhody:      - nedochází k přechlazení;  
                 - chemicky stabilní;  
                 - nekorozivní;

-nevýhody:    - poměrně nízké měrné skupenské teplo tání;  
                 - nízká tepelná vodivost;  
                 - velké změny objemu při změnách skupenství;  
                 - hořlavé;

-příklady organických PCM:

- parafinové vosky,  $l_t \sim 200 \text{ kJ/kg}$ ,  $t_t = 44, 53, 64^\circ\text{C}$ , malá tepelná vodivost ( $\lambda \sim 0,2 \text{ W/m.K}$ ), nutnost kombinace s kovovými maticemi, lamelami pro zvýšení vodivosti a přestupu tepla do pracovní látky;
- mastné kyseliny (kyselina stearová, palmitová),  $l_t \sim 150\text{-}180 \text{ kJ/kg}$ ,  $t_t \sim 30\text{-}65^\circ\text{C}$ ;
- vysokohustotní polyetylen.



Obrázek 22 Oblasti změny skupenství různých látek [8]

### 3.4.2 PROBLÉMY S PCM MATERIÁLY

Zásobníky, které používají materiály se změnou skupenství, mohou vykazovat některé problémy:

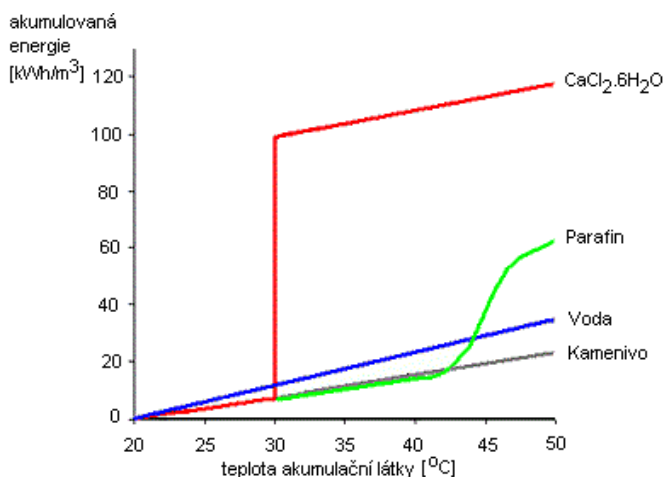
- optimální teplota tání-tuhnutí: v dnešní době jsou k dispozici materiály, které výrobce „namíchá“ na vhodnou požadovanou teplotu (vosky a parafíny);
- malá tepelná vodivost: kvůli nízké tepelné vodivosti musí být zajištěn dobrý přestup tepla přes kovové lamely nebo matricemi vnořenými do vlastního materiálu, zvýšení tepelné vodivosti lze také dosáhnout přidáním grafitu (kompozitní materiály);
- podchlazení materiálu: materiál neztuhne, zůstává v kapalném stavu, i když je dosaženo teploty tuhnutí (nedojde k uvolňování skupenského tepla), materiál začne tuhnout až působením nějakého vnějšího vlivu (mechanicky, elektricky);
- „změna objemu: tání i tuhnutí je doprovázeno změnou objemu (vosky cca 14 %);“
- korozivita: tu způsobují hlavně soli.

### 3.4.3 SROVNÁNÍ PCM MATERIÁLŮ S KLASICKÝMI MATERIÁLY

Tab. 4 Srovnání hustoty akumulované energie (klasické materiály a PCM látky) [6]

Akumulační látka v zásobníku	Hustota akumulované energie [kWh/m <sup>3</sup> ]
voda	34,5
kamenivo	23,0
parafín	62,4
hexahydrát chloridu vápenatého (CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	117,4
dekahydrát síranu sodného (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O)	131,7





Obrázek 23 Porovnání akumulace latentního a citelného tepla [9]

#### 3.4.4 SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNA ANDASOL 1

Jedná se o elektrárnu s koncentračními solárními kolektory, které pro výrobu elektřiny využívají parní turbíny.

Tepelný zásobník se skládá ze dvou nádrží (průměr 36 m a výška 14 m), které jsou naplněny směsí roztaveného dusičnanu sodného (60 %  $\text{NaNO}_3$ ) a dusičnanu draselného (40 %  $\text{KNO}_3$ ). Celková hmotnost akumulčního média je 28500 tun. Přes den se akumulční médium přečerpává z chladnější nádrže (290°C) do teplejší přes tepelný výměník, kde se teplonosným médiem ohřívá na akumulční teplotu, která je požadována (390°C). V noci je cirkulace obrácená, kdy akumulční médium ze zásobníku předává ve výměníku energii teplonosné látce solárního okruhu.



Obrázek 24 Elektrárna Andasol 1 [20]



Tab. 5 Základní parametry solární části elektrárny Andasol 1 [15]

Rozloha solárních jednotek	510 120 m <sup>2</sup>
Počet parabolických zrcadel	209 664
Počet absorpčních trubíc	22 464
Kapacita tepelného zásobníku	28 500 t akumulčního média kapacita 375 MWh=1,35 TJ

### 3.5 AKUMULACE S VYUŽITÍM SORPČNÍHO TEPLA

#### 3.5.1 AKUMULACE VYUŽÍVAJÍCÍ ADSORPCI VODNÍ PÁRY

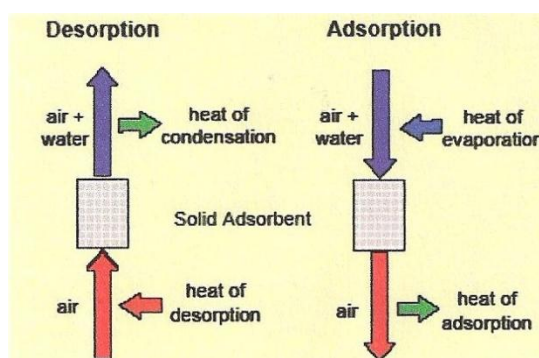
Tyto zásobníky (sorpční materiály) využívají uvolňování tepla, které způsobí adsorpce vodní páry v pórech nebo na povrchu materiálu, jde v podstatě o akumulaci vlhkosti.

Adsorpce je proces závislý na teplotě, při kterém se plynné látky ze směsi plynů nebo rozpuštěné látky v kapalině shromažďují na povrchu pevné látky (adsorbent). Tento proces způsobí exotermní reakci, při které se uvolňuje teplo. Opačným procesem je desorpce, kdy za přívodu tepla se absorbovaná látka z pevného povrchu adsorbentu uvolňuje.

Jako adsorbenty jsou používány silikagel (pórovitá forma oxidu křemičitého SiO<sub>2</sub>), zeolit (mikroporézní struktura, póry menší jak 2 nm), hydráty kovů, jíly a aktivní uhlí. Nevýhodou většiny materiálů je drahá cena a malý rozsah provozních teplot, jen mezi 20-150°C. Výhodou je značná hustota akumulace 500-1000 MJ/m<sup>3</sup>.

#### 3.5.2 ADSORPCE PŘI OTEVŘENÉM CYKLU

Zásobník sorpčního tepla je spjat se soustavou využívající vlhký vzduch, díky tomu se dá použít na cirkulační vytápění budov teplým vzduchem. Principem je, že vlhký vzduch uvnitř budovy prochází voštinovým zásobníkem/výměňníkem tepla, který je na bázi zeolitu, v jehož mikroporézní struktuře se adsorbuje vodní pára, přičemž se uvolňuje adsorpční teplo, které ohřívá teplotu procházejícího vzduchu o 15 až 25°C. Až dojde k úplnému nasycení materiálu vodní párou (v letním období), je třeba materiál vysušit teplým suchým vzduchem (desorpce).

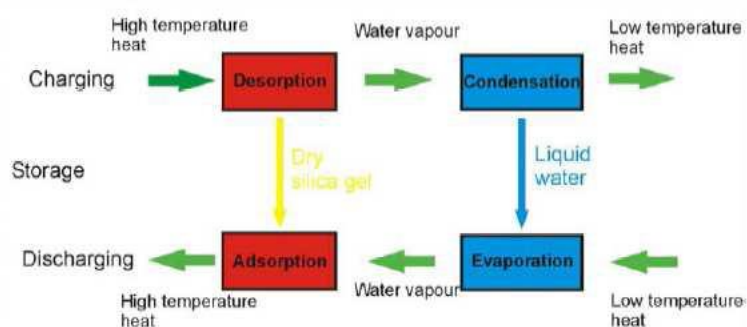


Obrázek 25 Adsorpce při otevřeném cyklu [8]



### 3.5.3 ADSORPCE PŘI UZAVŘENÉM CYKLU S TUHÝM SORBENTEM

Na povrchu porézní pevné látky (např. silikagelu) při adsorpci vodní páry se uskutečňuje změna mezi plynnou a kapalnou fází, při tom se uvolňuje adsorpční teplo. Toto teplo je potom součtem vypařovací energie pracovní látky a vázané energie adsorpčního páru (silikagel-voda).



Obrázek 26 Adsorpce při uzavřeném cyklu [8]

**Nabíjení,** neboli desorpce (vysoušení silikagelu)- teplo ze zdroje se přivádí do systému, kde zahřívá silikagel, a tím probíhá desorpce páry ze silikagelu (vysoušení). Tato desorbovaná pára se dále přivádí do kondenzátoru, kde následně kondenzuje při nízké teplotě. Kondenzační teplo se odvádí do okolí.

**Akumulace-** pracovní látka a vysušený adsorbent jsou od sebe odděleny (uzavřený spojovací ventil mezi výparníkem a adsorbentem). Po celou dobu oddělení těchto komponent je možná akumulace bez tepelných ztrát, při zanedbání tepelných ztrát citelného tepla.

**Vybíjení,** neboli adsorpce (nasávání silikagelu vodní parou)- spojovací ventil se otevře a ve výparníku se začne vypařovat vodní pára. Pára se následně adsorbuje do silikagelu, vznikne exotermní reakce a začne se uvolňovat adsorpční (využitelné) teplo.

### 3.6 AKUMULACE S VYUŽITÍM REAKČNÍHO TEPLA

Ideální termochemická reakce pro tepelnou akumulaci je reakce endotermická, kdy se reagujícím látkám přivádí tzv. reakční teplo a část tohoto tepla se akumuluje v reagujících látkách. Tuto reakci lze popsat rovnicí:



kde  $\Delta H$  [J/kg] je reakční teplo.

„Složky AB a A bývají většinou ve fázi pevné nebo kapalně, složka B bývá zpravidla plyn.“

Opačnou reakcí je reakce exotermická, při které reagující látky uvolňují naakumulované teplo, které můžeme využít. „Reagující látky, by měly být snadno oddělitelné a nepodléhat již dalším reakcím.“ Produkty reakce lze skladovat odděleně od sebe i při pokojové teplotě (není nutná žádná tepelná izolace). Tepelné ztráty ze zásobníků jsou jen ve formě citelného tepla, které jsou zanedbatelné ve srovnání s teplem z chemické reakce.



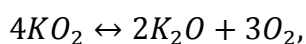
Naakumulované teplo lze vyjádřit rovnicí:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H,$$

kde  $a_r$  je podíl reagující látky,  $m$  [kg] je hmotnost látky,  $\Delta H$  [J/kg] je reakční teplo a  $Q$  [J] je akumulované teplo. (4)

Výhodou je hustota akumulace, která se pohybuje mezi 1000-3000 MJ/m<sup>3</sup>. Další výhodu můžeme najít při rozkladu oxidů kovů, kde při reakci vzniká jako plynná složka B kyslík, který může být po rozkladu využit na další účely. Při vratné reakci se poté využívá kyslíku z ovzduší.

Příklad rozkladu oxidu draslíku:



k reakcím dochází při teplotách mezi 300-800°C, při kterých se akumuluje/uvolní reakční teplo o velikosti 2,1 MJ/kg. [4] (5)

K nevýhodám můžeme zařadit problémy s vratnými reakcemi, chemickou nestabilitu látek, korozivitu (termochemický zásobník), toxicnost a cenu.

K chemickým reakcím se využívá rozkladů oxidů kovů, hydridů kovů a také peroxidů.

Tab. 6 Srovnání hustot akumulace různých materiálů [8]

Reakce materiálů			Hustota akumulace	Teplota reakce
AB ↔	A	+ B	[GJ/m <sup>3</sup> ]	[°C]
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	MgSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	2,8	122
FeCO <sub>3</sub>	FeO	CO <sub>2</sub>	2,6	180
Fe(OH) <sub>2</sub>	FeO	H <sub>2</sub> O	2,2	150
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	1,4	89



## ZÁVĚR

V bakalářské práci byly rozebrány v dnešní době používané způsoby akumulace tepla v solárních tepelných soustavách. Tyto způsoby akumulace tepla se liší ve fyzikálně chemických principech a ve velikostech hustoty akumulovaných energií. Nejjednodušším způsobem se jeví být akumulace citelného tepla, kde se využívá vlastního ohřevu pracovní látky a její měrné tepelné kapacity. Tento způsob se začal využívat jako první. Nejlepší pracovní látkou je bezesporu voda, která má největší tepelnou kapacitu a je jednoduše dostupná a levná. Na druhou stranu její velkou nevýhodou jsou nároky na velké objemy zásobníků a malý pracovní rozsah teplot. Dále se využívá tepelné kapacity kameniv, která už ovšem není tak velká jako u vody, ale výhodou je jednodušší konstrukce zásobníků. Akumulace latentního tepla využívá fázové přeměny látek a jejich tepelných kapacit. Využívá se pouze fázová přeměna mezi tuhou látkou a kapalinou, tj. skupenské teplo tání/tuhnutí. Hlavní výhodou tohoto způsobu je, že při změně skupenství se nemění teplota, zůstává konstantní až do doby, dokud neproběhne celá změna skupenství. Další výhodou je i vyšší hustota akumulované energie, než u tepla citelného. Pracovní teplotu zásobníku určuje konkrétní pracovní materiál. Používají se chemicky čisté látky (Glauberova sůl) nebo chemické směsi (parafíny). Tyto dva způsoby skladování tepla jsou dostupné a používají se již dlouho, i když jsou doprovázeny tepelnými ztrátami. Zásobníky sorpční pracují na principu hromadění se vodní páry na povrchu tuhé látky a akumulují teplo, které se uvolňuje při adsorpci. Poslední způsob, který je možný pro akumulaci, pracuje na principu vratných chemických reakcí, které jsou doprovázené uvolňováním a jímáním tepla. Výhodou je akumulovaná hustota energie, u těchto principů může být 2-6 krát vyšší než u citelného a latentního tepla. Výhodou je také bezztrátové ukládání tepla. Poslední dva způsoby jsou oproti předcházejícím ještě v usilovném vývoji a nejsou komerčně dostupné.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] LADENER, H., SPÄTE, F. Solární zařízení. Grada Publishing, První vydání, Praha, 2003. 268 s. ISBN 80-247-0362-9
- [2] MURTINGER, K., TRUXA, J. Solární energie pro váš dům. ERA group spol. s.r.o., 2. vydání, Brno, 2006. 92 s. ISBN 80-7366-076-8
- [3] BERANOVSKÝ, J., TRUXA, J. a kolektiv. Alternativní energie pro váš dům. ERA group spol. s.r.o., 2. aktualizované vydání, Brno, 2004. 123s. ISBN 80-86517-89-6
- [4] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. A Wiley-Interscience Publication. 2. vydání, 1980. 762 s. ISBN 0-471-05066-0
- [5] KLECZEK, J. Sluneční energie: úvod do helioenergetiky. SNTL – nakladatelství technické literatury, 1. Vydání, Praha, 1981. 192 s.
- [6] BĚHUNEK, I. Využití změny skupenství látek pro akumulaci tepla. 5. Odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí, Brno, 2003.
- [7] MATUŠKA, T. FSID.CVUT [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. Zásobníky tepla pro solární soustavy. Dostupné z WWW: <[http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/STT\\_solarni\\_zasobniky.pdf](http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/STT_solarni_zasobniky.pdf)>
- [8] MATUŠKA, T. FSID.CVUT [online]. 2009 [cit. 2011-05-25]. Skripta Solární tepelná technika. Dostupné z WWW: <[http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/skriptastt\\_2009.pdf](http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/skriptastt_2009.pdf)>
- [9] BECHNÍK, B. TZB-info [online]. 2003 [cit. 2011-05-25]. Akumulace tepelné energie – fyzikální principy. Dostupné z WWW: < <http://www.tzb-info.cz/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy> >
- [10] MATUŠKA, T. TZB-info [online]. 2005 [cit. 2011-05-25]. Trendy v solární tepelné technice (V)– zásobníky tepla. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/2799-trendy-v-solarni-tepelne-technice-v-zasobniky-tepla>>
- [11] MATUŠKA, T. TZB-info [online]. [cit. 2011-05-25]. Zásobníky tepla s řízeným teplotním vrstvením (stratifikací). Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/solarni-kolektory/zasobniky-tepla-s-rizenym-teplotnim-vrstvenim-stratifikaci>>
- [12] KRAMOLIŠ, P. TZB-info [online]. 2004 [cit. 2011-05-25]. Zásobníky tepla. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>>
- [13] OREL, V. TZB-info [online]. 2002 [cit. 2011-05-25]. Akumulace tepelné energie při skupenských změnách látek. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/1005-akumulace-tepelne-energie-pri-skupenskych-zmenach-latek>>
- [14] DVOŘÁK, J. Solární liga [online]. 2005 [cit. 2011-05-25]. Německé know-how v mezisezónním skladování z hlediska výhodnosti zvoleného zásobníku tepla. Dostupné z WWW: <<http://www.solarniliga.cz/cas0409.html>>



- [15] NEJEDLÝ, P. Nalezno.cz [online]. 2009 [cit. 2011-05-25]. Nejmodernější solární elektrárna na světě: Španělský Andasol. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika/nejmodernejsi-solarni-elektrarna-na-svete-spanelsky-andasol.aspx>>
- [16] MURTINGER, K. Solární liga [online]. 2006 [cit. 2011-05-25]. Odpovědná. Dostupné z WWW: <<http://www.solarniliga.cz/odpovedna.html>>
- [17] Wodagreen [online]. [cit. 2011-05-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.wodagreen.com/jaknato/tuv/wdstuv.htm>>
- [18] Solarnetshop [online]. [cit. 2011-05-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.solarnetshop.cz/plochy-slunecni-kolektor-kpw2/>>
- [19] BallBrno [online]. [cit. 2011-05-25]. Využitelnost solárních zařízení v České republice Dostupné z WWW: <[http://www.ballbrno.cz/html\\_cz/produkty-kolektory.html](http://www.ballbrno.cz/html_cz/produkty-kolektory.html)>
- [20] Wikipedie otevřená encyklopedie [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. Andasol Solar Power Station. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Andasol\\_1](http://en.wikipedia.org/wiki/Andasol_1)>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

TV		teplá voda
UV		užitková voda
V	[m <sup>3</sup> ]	objem
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
c	[J/kg.K]	měrná tepelná kapacita
t	[°C]	teplota
Q	[J]	teplo
$\lambda$	[W/m.K]	tepelná vodivost
$l_t$	[J/kg]	skupenské teplo tání
m	[kg]	hmotnost
$\Delta H$	[J/kg]	reakční teplo
$a_r$	[-]	podíl reagující látky

